

平成 21 年 6 月 1 日現在

研究種目：基礎研究(C)

研究期間：2007～2008

課題番号：19560114

研究課題名（和文） 単結晶ダイヤモンド工具による鋼類の超精密切削に関する研究

研究課題名（英文） Ultra Precision Cutting of Steel with Single Crystal Diamond Tool

研究代表者

柴坂 敏郎 (SHIBASAKA TOSHIROU)

神戸大学・大学院工学研究科・准教授

研究者番号：80094530

研究成果の概要：材料として需要度の高い鋼類の超精密切削にはダイヤモンド工具一般に適さないとされる。一方、断続切削となる超音波楕円振動切削では鏡面切削が可能で、工具摩耗が抑制されるという結果を背景に、断続切削で平面加工が可能なフライカット方式と微小曲面創成が可能な高速主軸を用いたマイクロ・ダイヤモンド・エンドミルによる超精密切削法の可能性を検討し、実用的な金型鋼の鏡面切削が可能であることを明らかにしている。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	2,100,000	630,000	2,730,000
2008年度	1,400,000	420,000	1,820,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,500,000	1,050,000	4,550,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学・生産工学・加工学

キーワード：超精密加工

## 1. 研究開始当初の背景

工業製品の超精密化、微細化が一段と進む中であって、超精密マイクロ切削は次世代の工業製品製造に欠くことのできない、きわめて重要な加工法として認識されている。特に各種の超精密部品を作るために必要とされる超精密マイクロ金型の生産技術は、重要な加工技術の一つである。そのため超精密マイクロ切削では、あらゆる工具材質の中で最も硬度が高く、かつ最も鋭利な切れ刃を作ることができる単結晶ダイヤモンド工具を用いることによって、複雑で微細な形状を、超精密に、しかもナノメートル・オーダーの仕上げ面粗さを得ることができる唯一の加工法

である。

しかしながら、単結晶ダイヤモンド工具で切削可能な被削材は限られており、最も需要が高いと考えられる鋼類や硬度が高いセラミック、超硬合金には適さない。単結晶ダイヤモンド工具で鋼類を切削すると工具摩耗が激しく、実用的な切削はできないとされている。これまでの研究で、カーボン（炭素）リッチな雰囲気下で切削、切削点を液体窒素で冷却、ダイヤモンドに次いで硬度が高いC BN（立方晶窒化ホウ素）単結晶工具の利用などが検討されている。実用的な方法は工具に超音波振動を加えながら切削する超音波振動切削のみである。超音波楕円振動切削は、

鋼類のみならず各種難削材の超精密マイクロ切削に適用され、最大仕上げ面粗さで10ナノメートル・オーダーの鏡面仕上げが得られている。現在、この方法では工具に超音波振動を与えるため、工具が固定された加工法（旋削やプレーナ加工）に限られ、工具が回転するフライス加工への応用は困難である。

## 2. 研究の目的

新しい概念に基づく単結晶ダイヤモンド工具による超精密マイクロ・フライス切削加工法を提案し、その実用に向けた開発を行うことを目的としている。超音波振動切削法の検討から、振動による工具の一回ごとの断続切削での接触時間が短いほど工具摩耗が小さくなるという重要な結果が得られている。そこで、フライカット方式により、回転体に単結晶ダイヤモンド工具を取り付け、主軸回転速度と工具直径を適当に選択することにより、工具摩耗の抑制を実現できる可能性がある。また小径のエンドミルにおいては超高速主軸を用いて回転数をあげることにより、一枚刃のエンドミルと被削材の接触時間を短く保つ条件を選べばよい。これら超精密マイクロ切削加工法の検討が具体的な内容である。

## 3. 研究の方法

(1) 鋼類の超精密切削における工具摩耗機構の実験的検討 図1に示すように凸形状の被削材の正面旋削による断続切削により、ダイヤモンド工具と鋼の接触温度、接触時間、工具負荷などの観点から、ダイヤモンド工具の摩耗特性を検討し、鋼のダイヤモンド切削法の基礎的なデータを求める。被削材はSUS304で、切込み $5\mu\text{m}$ 、凸形状の断続切削幅 $50\mu\text{m}$ 、切削速度 $100\text{m}/\text{min}$ とし、接触時間 $0.03\text{msec}$ で、送り速度を変化させ実験を行った。

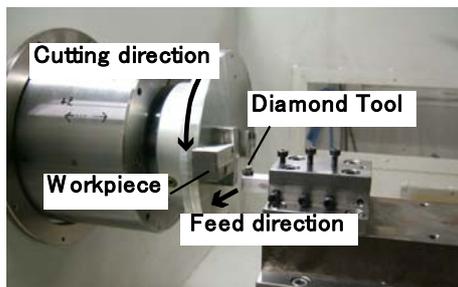


図1 断続切削試験方法

(2) フライカット方式による鋼類の超精密ダイヤモンド切削法の開発 フライカット方式による超精密切削法では、フライカット工具の直径と主軸回転数から、断続切削における一回毎の切削時間（工具と被削材の接触時間）が定まる。被削材は実用的な金型鋼SUS420J2(HRC40)を対象として、工具回転主

軸 $10,000\text{rpm}$ に対して、フライカットにおける一回毎の接触時間を摩耗抑制が可能な条件として $0.02\text{ms}$ と設定した。図2は実験装置の概観を示す。ここでは、フライカットの可能性について、工具形状、工具摩耗、仕上げ面粗さに及ぼす影響を検討した。

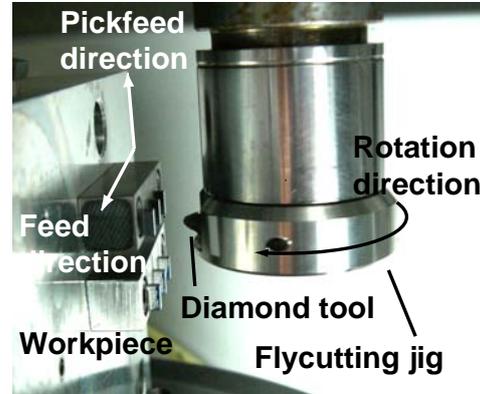


図2 フライカット超精密切削方法

(3) マイクロ・エンドミルと超高速主軸による鋼の超精密マイクロ切削加工法の開発 ダイヤモンド工具による鋼類の超精密切削加工の実用化を目的とし、マイクロ・ダイヤモンド・エンドミルによる超精密マイクロ・ダイヤモンド切削加工法の検討を行った。図3に超精密加工機の概要、および図4に被削材、工具形状の概要を示す。超高速主軸の回転数は $100,000\text{rpm}$ である。ダイヤモンド・エンドミル工具については工具剛性の点から図4のような板状のダイヤモンド・エンドミル工具を作成した。

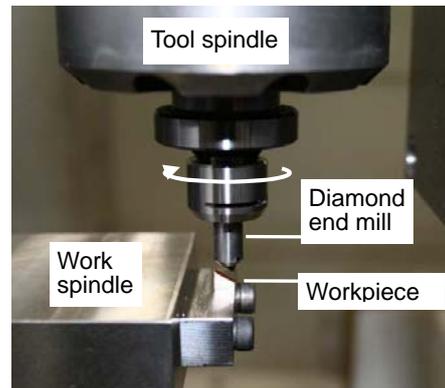


図3 超精密ダイヤモンド・エンドミル加工

前項と同様、実用的な金型鋼SUS420J2(HRC40)を対象として、切削面積 $2\times 5\text{mm}$ のマイクロ金型を想定した。ここでは、工具回転半径、工具逃げ角の工具形状、切削油剤使用の有無、摩耗抑制の重要な要因となる一回毎の接触時間に関する切削条件の影響について実験検討を行った。なお、工具逃げ角については図4のエンドミル工具の製作上、 $20^\circ$ を上限とした。

さらに、超精密マイクロ・ダイヤモンド切削技術の実用化への検討を行った。

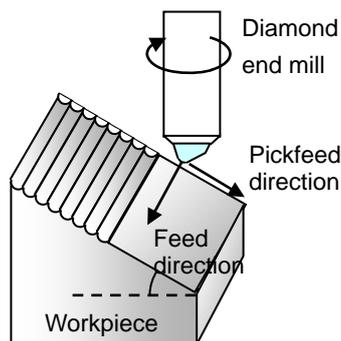


図4 エンドミル法と工具形状

#### 4. 研究成果

(1) ダイヤモンド工具の工具摩耗機構の実験的検討 図5は単位切削距離あたりの工具摩耗を検討した結果である。送り速度を小さくして切削厚さを小さくすれば単位切削距離当りの工具摩耗は小さくなるがわかり、切削厚さが小さくすることにより切削温度が低下し、工具摩耗が小さくなるものと推定される。また、すくい角を小さくし、逃げ角が大きい時工具摩耗が小さくなった。

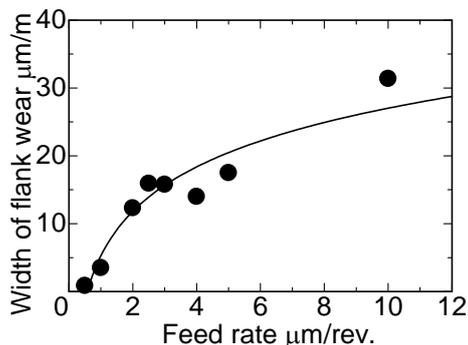


図5 工具摩耗に及ぼす送り速度の影響

(2) フライカット方式による鋼類の超精密ダイヤモンド切削 図6, 7は結果の例として、工具逃げ角およびピックフィードの表面粗さに及ぼす結果を示している。なお、工具摩耗は摩耗面が滑らかであることから、機械的な摩耗ではなく、熱化学的な摩耗と考えられる。図6の工具逃げ角については、15°, 30°, 35°, 45°の限定された結果ではあるが、30°~35°付近で仕上げ面が良好となり、最適な値が存在することが推定される。また、ピックフィードについては余り小さくできないことが理解される。同一加工面積に対してピックフィードを小さくすることは総切削距離が長く摩耗が大きくなることに起因しており、同一切削距離ではピックフィードが小さいほど切削厚さが小さく、仕上げ面精度、

工具摩耗は改善される。対象とした実験条件内で、切削面積 2x5mm に対して 40nmRz の表面粗さが得られた。

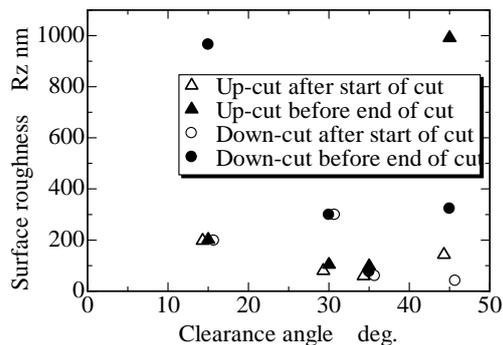


図6 表面粗さに及ぼす工具逃げ角の影響

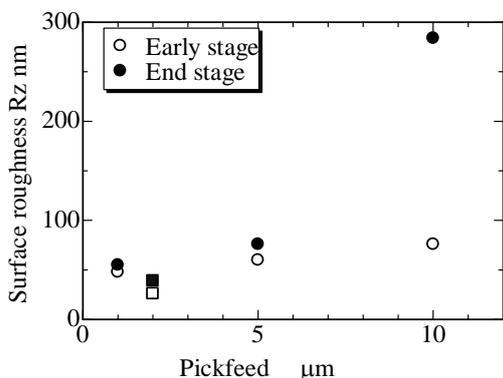


図7 表面粗さに及ぼすピックフィードの影響

#### (3) 超精密マイクロ・ダイヤモンド切削加工

図8は工具摩耗の観察例で、摩耗面は滑らかであることから、前項までと同様、機械的な作用による摩耗ではなく、熱化学的な摩耗と考えられる。摩耗は、ミスト雰囲気中で加工すると小さくなり、工具回転半径が2mmの場合は大きくなるのがわかった。工具逃げ角を20°と大きくすると工具形状から逃げ面摩耗は小さくなるが、刃先後退量は大きな変化はないことがわかった。

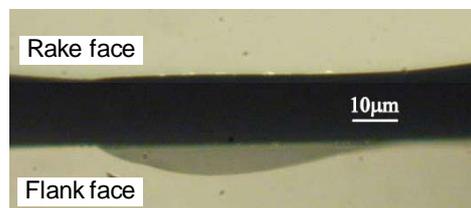


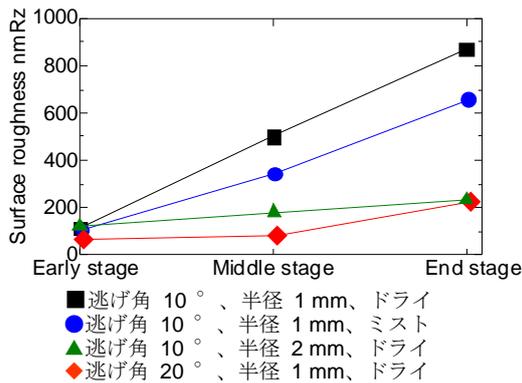
図8 ダイヤモンドエンドミルの工具摩耗の観察例

図9は三次元構造解析顕微鏡で表面粗さを測定した結果である。ピックフィード方向の切削距離5mmに対し、加工開始時、中盤および加工終了時付近の、摩耗に伴う表面粗さの推移として示している。同図から、工具回転半径を大きくすると、工具摩耗は大きくなる

が、表面粗さは明らかに改善されること、また、工具逃げ角による前述のように刃先後退量は大きな変化はなく、表面粗さについては明らかに改善されることわかる。

図 10 は工具回転半径および工具逃げ角を大きくし、切削油剤としてミストの使用による表面粗さへの影響を検討した結果である。ミストの使用では摩耗量は前述のように若干改善されるが、表面粗さへの効果はほとんどないこと、また、工具回転半径 2mm、工具逃げ角 20° エンドミル工具で 100nmRz の表面粗さの鏡面が得られていることがわかる。切削開始時で表面粗さが 60nmRz 程度であり、加工による逃げ面摩耗量は 4μm であり、この摩耗の表面粗さへの影響は 40nmRz 程度であり、切削開始時で表面粗さが大きな影響を持つことが理解できる。なお、切込みは 3μm で、ピックフィードは 5μm で、ピックフィードをこれ以上小さくしても表面粗さは改善されなかった。また、高速主軸回転数 10,000rpm 以下では、工具と被削材の接触時間は 0.1msec. 以下の条件を満たすが、表面粗さは改善されなかった。

図 9 表面粗さの推移に及ぼす工具逃げ角、



工具半径および加工雰囲気の影響

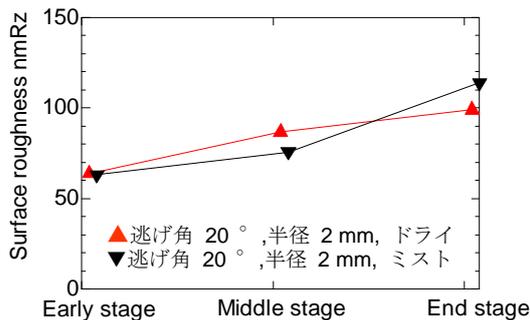


図 10 表面粗さの推移に及ぼす加工雰囲気の影響

工具の振れを検討した結果、振れ幅の変動が 60nm 程度あり、加工機の主軸系の精度に大きな課題があると考えられる。従って、マイクロ金型を 40nmRz 程度の表面粗さに仕上げる事が可能であると推定された。

(4) 超精密マイクロ・ダイヤモンド切削技術の実用化への検討 回転工具による鋼類の超精密マイクロ・ダイヤモンド切削技術の実用化に向けた検討として有効径 2mm, 曲率半径 12mm, 深さ 45μm の球面の加工を行った。条件はピックフィード 5μm, 工具回転数 100,000min<sup>-1</sup>, 送り 20mm/min, ダウンカット, ドライの条件である。結果として半球は鏡面加工ができたが、残りの半球は十分な表面粗さが獲られなかった。高速主軸の取付けにより工作機械の制御軸が三軸となっており、曲面の加工により工具の被削材との接触点に変化することに起因すると考えられ、工作機械の制御機能を今後検討する必要があると推定された。

## 5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 1 件)

- ① 柴坂敏郎、石田直人  
単結晶ダイヤモンドエンドミルによる鉄系材料の超精密切削  
日本機械学会論文集 掲載予定

[学会発表] (計 3 件)

- ① 石田直人、柴坂敏郎、鈴木浩文  
単結晶ダイヤモンドエンドミルによる鉄系材料の超精密切削  
日本機械学会, 第 7 回生産加工・工作機械部門講演会, 2008, 11, 21, 岐阜
- ② N. Ishida, T. Shibasaki, H. Suzuki  
Ultra precision cutting of steel with single crystal diamond end mill  
The 1st International Conference on Nanomanufacturing  
July 14-16, 2008, Singapore
- ③ T. Moriwaki, T. Shibasaki, H. Suzuki  
Ultraprecision Diamond Cutting of Steel by Intermittent Cutting  
Proc. of the 7<sup>th</sup> euspen International conference, 2007.5.23, Germany

[産業財産権]

- 出願状況 (計 1 件)  
名称: 切削条件決定方法  
発明者: 柴坂敏郎, 森脇俊道, 鈴木浩文, 宋詠燦  
権利者: 財団法人新産業創造研究機構  
番号: 特願 2007-159788  
出願年月日: 19. 6. 18  
国内

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

柴坂 敏郎 (SHIBASAKA TOSHIROU)  
神戸大学・大学院工学研究科・准教授  
研究者番号:80094530

### (2) 研究分担者

鈴木 浩文 (SUZUKI HIROFUMI) 2007 年度  
神戸大学・大学院工学研究科・准教授  
研究者番号:20282098

中本 圭一 (NAKAMOTO KEIICHI) 2007 年度  
神戸大学・大学院工学研究科・助教  
研究者番号:90379339

### (3) 連携研究者

鈴木 浩文 (SUZUKI HIROFUMI) 2008 年度  
中部大学・工学部・教授  
研究者番号:20282098

中本 圭一 (NAKAMOTO KEIICHI) 2008 年度  
大阪大学・大学院工学研究科・助教  
研究者番号:90379339